

2017

X Reunión Española de Optoelectrónica



Santiago de Compostela

12-14 Julio de 2017

EDITADO POR:

Justo Arines Piferrer

Manuel Blanco Fraga

María Teresa Flores Arias

María del Carmen Bao-Varela

María de la Inmaculada Aymerich López

Publicado por:

Asociación Científica de Óptica y Fotónica de Santiago

ISBN: 978-84-16989-81-2

ISBN 978-84-16989-81-2



Estimación del desplazamiento de frecuencia de Brillouin en sistemas sensores distribuidos de fibra óptica mediante algoritmos subpíxel

Brillouin frequency shift estimation in optical fiber distributed sensor systems via subpixel algorithms

Rubén RUIZ-LOMBERA ⁽¹⁾, Alberto RODRIGUEZ-CUEVAS ⁽¹⁾, José-Miguel LÓPEZ-HIGUERA ^(1,2,3), Jesús MIRAPEIX ^(1,2,3)

1. Grupo de Ingeniería Fotónica, Universidad de Cantabria, Santander, España.
2. Centro de Investigación Biomédica en Red en Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN), Cantabria, España.
3. Instituto de Investigación Sanitaria Valdecilla (IDIVAL), Cantabria, España

Persona de contacto: Rubén Ruiz-Lombera (ruben.ruiz@unican.es).

RESUMEN:

En el presente trabajo se propone el uso de algoritmos subpíxel para la estimación del desplazamiento de la frecuencia de Brillouin en sistemas sensores distribuidos. Esta solución permite sustituir el tradicional ajuste Lorentziano, que implica un tiempo computacional elevado, siendo por lo tanto idónea para la realización de medidas dinámicas. Por medio de estudios experimentales se estudiará el rendimiento del enfoque propuesto en función de parámetros como el paso frecuencial seleccionado.

Palabras clave: BOTDA, dispersión estimulada de Brillouin, sensores distribuidos, sensores de fibra óptica, estimación de la BFS, algoritmos supíxel, ajuste Lorentziano

ABSTRACT:

In this work, we propose the employment of subpixel algorithms for the estimation of the Brillouin frequency shift in distributed sensor systems. This solution allows to replace the commonly chosen Lorentzian fitting that involves a high computational cost, thus being especially suitable for dynamic measurements. Several experimental tests will enable the analysis of the performance of this approach in terms of different parameters such as the frequency granularity.

Key words: BOTDA, stimulated Brillouin scattering, distributed sensors, optical fiber sensors, BFS estimation, subpixel algorithm, Lorentzian fitting

1.- Introducción

Los sensores distribuidos de fibra óptica, fundamentalmente basados en la dispersión de Raman o Brillouin, han experimentado un importante auge investigador en los últimos años. Su capacidad de ofrecer medidas distribuidas de temperatura y/o *strain* a lo largo de decenas de kilómetros y con resoluciones del orden o incluso inferiores al metro ha abierto las puertas a aplicaciones difícilmente implementables mediante otros

enfoques, como la monitorización de líneas eléctricas de alta tensión, de oleoductos, gaseoductos [1] y autopistas del agua [2] y de grandes infraestructuras de obra civil [3], por mencionar algunos ejemplos.

Los sistemas basados en la dispersión estimulada de Brillouin, en particular las implementaciones BOTDA (*Brillouin Optical Time Domain Analysis*) han sido estudiados en profundidad, mejorándose no sólo el rango de medida y la resolución espacial alcanzables, sino también la exactitud en las

medidas de temperatura y *strain* [4] o la complejidad de las unidades interrogadoras [5]. Dentro de las contribuciones realizadas en estos sistemas destacan también aquellas destinadas a la medida de eventos dinámicos de manera distribuida. Los sistemas BOTDA convencionales presentan algunos inconvenientes para poder llevar a cabo medidas rápidas, como la limitación impuesta por el tiempo de vuelo de los pulsos de bombeo, la necesidad de implementar un barrido en frecuencia entre las ondas de prueba y bombeo o el uso de promediados elevados de las trazas de salida para cada frecuencia con objeto de mejorar la relación señal a ruido.

En este contexto existe otra limitación adicional asociada a la estimación del BFS (*Brillouin frequency shift/desplazamiento en frecuencia de Brillouin*), ya que ésta se realiza normalmente mediante un ajuste Lorentziano sobre el espectro de ganancia asociado a cada posición espacial de la fibra de medida. Este proceso es iterativo, lo que implica un elevado coste/tiempo de computación que penaliza adicionalmente el tiempo necesario para la obtención de una medida distribuida completa. Como alternativa a este procedimiento, en este trabajo se propone el uso de algoritmos subpíxel para la estimación de la BFS [6]. Al tratarse de algoritmos muy eficientes computacionalmente, éstos parecen idóneos para la realización de medidas dinámicas, si bien habrá que estudiar su rendimiento en cuanto a la exactitud en la medida en frecuencia ofrecida.

2.- Setup experimental y algoritmos subpíxel

Para evaluar la solución propuesta se llevaron a cabo diferentes medidas con un *setup* BOTDA como el que se muestra en la Fig. 1. El sistema es una implementación estándar en la que una única fuente láser es utilizada para generar las ondas de prueba y de bombeo. La primera (rama inferior) se genera mediante un generador de RF y un modulador electro-óptico, mientras que los pulsos de bombeo se forman gracias a un amplificador óptico semiconductor (SOA), seguido de un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) y un aleatorizador de polarización.

La detección de la señal de prueba (tras su interacción con el bombeo en la fibra de medida (FUT)) se lleva a cabo mediante un filtro que elimina la portadora y la banda anti-Stokes (ya que en este caso el sistema se ha configurado para trabajar en ganancia), un fotodetector de alta transimpedancia y una tarjeta adquisidora vinculada a un PC.

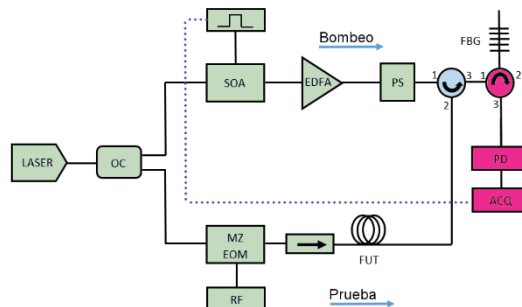


Fig. 1: Representación esquemática del sistema BOTDA empleado para la validación experimental.

Como se ha comentado anteriormente, en la literatura el procedimiento habitualmente empleado para la estimación del BFS es un ajuste Lorentziano, ya que, en condiciones normales, se asume que el espectro de ganancia de Brillouin (BGS: *Brillouin Gain Spectrum*) se ajustará a dicha distribución. La implementación de dicho ajuste generalmente implica la suposición de unos valores iniciales para los parámetros involucrados y, posteriormente, un proceso iterativo de ajuste hasta que se satisface el criterio de error establecido. Si bien de esta manera se obtiene una buena estimación de la BFS, el tiempo de procesado implicado no es el adecuado para medidas dinámicas. En este caso los algoritmos subpíxel pueden ser una opción mucho más conveniente. Comúnmente empleados en el ámbito del procesado de imagen [6] o incluso en la espectroscopia de plasmas [7] o en la interrogación de redes de Bragg [8], se trata de soluciones simples y muy eficientes que permiten mejorar la resolución espectral considerada a priori. Por ejemplo, el algoritmo del centroide o CDA (*Centroid Detection Algorithm*) se basa en la estimación del centro de masas del pico (espectro de ganancia de Brillouin en nuestro caso) para el cálculo de la *frecuencia subpíxel*, tal que:

$$f_{sub} = \frac{\sum_j f_j i_j}{\sum_j i_j}, \quad (1)$$

donde f_{sub} es la frecuencia subpíxel, y f_j e i_j la frecuencia e intensidad asociadas con el píxel (o muestra) j .

3.- Resultados obtenidos

Para poder establecer una comparación entre el rendimiento del algoritmo CDA anteriormente descrito y el tradicional ajuste Lorentziano en la estimación del BFS, se diseñaron una serie de experimentos. Para ello se empleó una fibra estándar monomodo con una frecuencia de Brillouin de aproximadamente 10.70 GHz. Se consideraron barridos en frecuencia entre 10.59 y 10.79, con pasos frecuenciales (granularidades) de 2, 4, 6, 8, 10 y 20 MHz y un promediado de 4096 muestras.

En la Fig. 2 se muestran 2 ejemplos de los resultados obtenidos. En primer lugar, en la Fig. 2(a) se muestra una comparativa entre la evolución del BFS para diferentes granularidades, en concreto de 2 y 20 MHz. Como es de esperar, la selección de una granularidad mayor implica un empeoramiento en las características de la traza de salida, mostrando ésta un mayor ruido, especialmente a medida que aumenta la distancia de medida, así como un mayor error en relación al valor estimado con la granularidad de 2 MHz.

En la Fig. 2(b) se presenta una comparativa en la evolución del BFS estimada mediante el ajuste Lorentziano y el algoritmo CDA, ambos para el peor caso supuesto: una granularidad de 20 MHz. Por un lado puede observarse como claramente la solución propuesta ofrece para los primeros kilómetros una estimación del BFS más cercana a la que se considera de referencia, la asociada al ajuste Lorentziano con granularidad de 2 MHz. A partir del kilómetro 30 el valor ofrecido por el algoritmo CDA se aproxima más al del ajuste Lorentziano con granularidad de 20 MHz. El error cuadrático medio calculado para toda la fibra (con las curvas mostradas en la Fig. 2(b)) arroja unos valores de 2.68 MHz para el ajuste Lorentziano y 1.80 MHz para CDA. Por otro

lado, puede observarse también como el ruido asociado a las trazas es inferior en el caso del algoritmo CDA, en concreto la desviación estándar, estimada en este caso sobre la sección de fibra entre los 30 y 40 km, es de 1.69 MHz para el ajuste Lorentziano y de 0.86 para CDA (ambos de nuevo para una granularidad de 20 MHz).

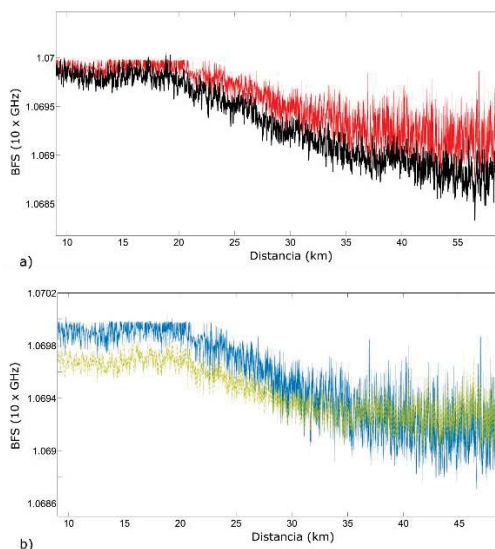


Fig. 2: Ejemplo de los resultados obtenidos: a) Comparación de la evolución del BFS para ajuste Lorentziano y granularidades de 2(en negro) y 20(en rojo) MHz; b) Comparación de la evolución del BFS para ajuste Lorentziano (en azul) y algoritmo CDA (en verde) para granularidad de 20 MHz. Las trazas roja y azul (20 MHz) se saturan un poco al principio debido a la elevada granularidad del proceso empleado.

Aunque estos datos indican un rendimiento interesante por parte del algoritmo subpíxel seleccionado, una de las principales motivaciones para la propuesta de esta solución es la mejora computacional derivada de la sustitución del enfoque basado en el ajuste Lorentziano. En este sentido, el tiempo medio (promediado sobre 10 experimentos) de procesamiento asociado al algoritmo CDA fue de 241 ms para toda la fibra desplegada, considerando una granularidad de 2 MHz y una matriz de datos por experimento de 101x12000 muestras frecuenciales y espaciales, respectivamente. Bajo las mismas condiciones, el uso del ajuste Lorentziano da lugar a tiempos de procesamiento en el orden de varios minutos.

5.- Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto el uso de algoritmos subpíxel, en particular del algoritmo CDA, para la estimación del desplazamiento en frecuencia de Brillouin BFS en un sensor distribuido BOTDA. La solución habitual en este contexto se ha basado en el uso de un proceso de ajuste Lorentziano que, si bien aporta una buena estimación frecuencial, implica un tiempo de procesamiento elevado al tratarse de un proceso iterativo.

En los tests experimentales realizados, se ha podido verificar como el algoritmo CDA ofrece una buena estimación del BFS cuando la granularidad empleada es elevada, por ejemplo 20 MHz, siendo las trazas resultantes menos ruidosas en este caso. Dado que el coste computacional está varios órdenes de magnitud por debajo del ajuste Lorentziano, esta solución parece idónea en el contexto de medidas dinámicas, donde se pueden llegar a requerir varias medidas por segundo.

En trabajos próximos se analizará el rendimiento de la solución propuesta en un mayor rango de supuestos, simulando *hotspots* al final del canal y analizando el efecto de diferentes factores, como el promediado realizado en la etapa de adquisición.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido cofinanciado por los proyectos TEC2013-47264-C2-1-R, TEC2016-76021-C2-2-R (AEI/FEDER, UE).

Referencias

- [1] D. INAUDI, and B. GLISIC, "Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic sensing," *Journal of pressure vessel technology*, 132(1), 011701 (2010).
- [2] R. RUIZ-LOMBERA, J. MIRAPEIX SERRANO, O. MARTINEZ et al., "Experimental demonstration of a leakage monitoring system for large diameter water pipes using a fiber optic distributed sensor system." 1885-1888.
- [3] L. THÉVENAZ, M. FACCHINI, A. FELLAY et al., "Monitoring of large structure using distributed Brillouin fibre sensing." 3746, 345-348.
- [4] Y. DONG, X. BAO, and W. LI, "Differential Brillouin gain for improving the temperature accuracy and spatial resolution in a long-distance distributed fiber sensor," *Applied optics*, 48(22), 4297-4301 (2009).
- [5] H. IRIBAS, J. URRICELQUI, J. MARINELARENA et al., "Cost-effective Brillouin optical time-domain analysis sensor using a single optical source and passive optical filtering," *Journal of Sensors*, 2016, (2016).
- [6] P. BING, X. HUI-MIN, X. BO-QIN et al., "Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation," *Measurement Science and Technology*, 17(6), 1615 (2006).
- [7] J. MIRAPEIX, A. COBO, C. JAÚREGUI et al., "Fast algorithm for spectral processing with application to on-line welding quality assurance," *Measurement Science and Technology*, 17(10), 2623 (2006).
- [8] J. ALVES, J. SANTOS, A. CARVALHO et al., "Fiber Bragg sensor interrogation system based on a CCD spectrometer." In *Sensors*, 2003. *Proceedings of IEEE* (Vol. 2, pp. 909-913).